

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04574

研究課題名（和文）SiCパワーデバイスの高信頼化に向けたNBTI現象の理解と抑制指針の提示

研究課題名（英文）Understanding of NBTI phenomenon and its control guidelines for high reliability SiC power devices

研究代表者

岡本 大（Okamoto, Dai）

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：50612181

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、次世代パワーデバイス素子として期待されているSiC MOSFETにおいて問題となっている負のゲートバイアス印加時のしきい値電圧不安定性(NBTI)の原因を特定し、制御指針を提示する研究である。正確にしきい値変動を測定するために、改良高速On-the-fly法およびOn-the-flyチャージポンピング法という手法を用いて、正確なしきい値電圧の変動の測定とそのメカニズムの解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代パワー半導体であるSiC MOSFETは市販が開始されているが、しきい値変動などの問題が残されており、そのメカニズムの学術的な議論は重要である。本研究では、2つの手法を新しく用いて、SiC MOSFETのしきい値変動メカニズムの解析を行った。まず、改良高速On-the-fly法を提案し、より正確にしきい値電圧変動を行うことが可能となった。また、SiCに対しては試みられていなかったOn-the-flyチャージポンピング法という手法を用いて、界面準位が生成される様子を解析した。これらにより、しきい値電圧の変動メカニズムを明らかにすることができた。

研究成果の概要（英文）：This study identifies the causes of threshold voltage instability (NBTI) in SiC MOSFETs under negative gate bias stress, and provides guidelines for solving the problem. In order to accurately measure the threshold voltage shift, the improved fast on-the-fly method and the on-the-fly charge pumping method were used to analyze the threshold voltage shift and its mechanism.

研究分野：電気電子工学

キーワード：シリコンカーバイド MOSFET しきい値電圧変動 NBTI チャージポンピング MOS界面 信頼性

1. 研究開始当初の背景

本研究は、次世代パワーデバイス素子として期待されている SiC MOSFET において問題となっている負のゲートバイアス印加時のしきい値電圧不安定性(NBTI)の原因を特定し、制御指針を提示する研究である。研究を開始した当初においては、SiC MOSFET の普及が進みつつあったが、負のゲートバイアスを印加した時にしきい値電圧が変動することが問題となっていた。しかし、しきい値不安定性がどのような欠陥が原因で生じるのか、SiC デバイスに対してはほとんど学理的な議論がなされておらず、良く分かっていなかった。

このような状況の中、代表者らは SiC p チャンネル MOSFET に対して高速 I_d 測定を適用してしきい値変動を調べ、他グループから報告されている n チャンネル素子を用いた NBTI 測定には問題があることを指摘していた。従来の報告は、n チャンネル SiC MOSFET に対してオフ側の負バイアスストレス印加後に、オン側の正バイアスを印加してしきい値電圧を測定したものであるが、正バイアス印加時に流入した電子により捕獲されていた正孔が中和され、短時間しきい値変動成分に誤差が生じるためである。この結果は、SiC デバイスを長期間使用する際の特性変動予測に役立つ重要な知見である。一方で、その原因として考えられる価電子帯側の欠陥評価に関する文献はほとんど存在していなかった。また、SiC MOSFET のチャンネル移動度を改善するためによく用いられている窒素の存在が SiC 素子の NBTI に与える影響も分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の課題に対して、NO アニール時間を変更することで界面窒素濃度を変更した種々のサンプルに対して NBTI ストレス試験を行い、窒素の存在がしきい値変動に与える影響を明確化すること、および、新規界面準位評価手法を用いることにより NBTI の原因となっている欠陥の性質を特定することを試みた。これらの研究を通じて、NBTI 現象を抑制する指針を示し、しきい値変動が抑制された SiC MOSFET 作製への指針を示すことが目的である。

3. 研究の方法

(1) p チャンネル MOSFET に対する改良高速 OTF 法によるしきい値測定

4H-SiC (0001)Si 面上に作製した p チャンネル MOSFET に対して、新規しきい値電圧シフト測定方法による評価を行った。従来、SiC MOSFET に対する NBTI 評価は、n チャンネル素子を用いて、ストレス印加としきい値測定を繰り返す MSM(Measure-Stress-Measure)法を用いた報告がほとんどであった。しかし、n チャンネル素子に対する MSM 法では、負バイアスストレス時にトラップに捕獲された正孔が、しきい値測定の際にチャンネルに流れ込み電子と再結合するため、正確な評価とは言えなかった。また、MSM 法では、少なくとも $\sim 10^{-4}$ s のスイープ時間が必要であるため、 $\sim 10^{-4}$ s 以上の遅い NBTI 変動しか捉えられない。そこで、p チャンネル SiC MOSFET に高速 On-the-fly (OTF)法を適用することで、速い NBTI 変動を観測する手法を提案した。高速 OTF 法は、図 1 に示す回路を用いて、ゲートストレスを印加しながらドレイン電流の変動を高速に測定し、次の式によってしきい値電圧変動 $\Delta V_{th}(t)$ を得る。

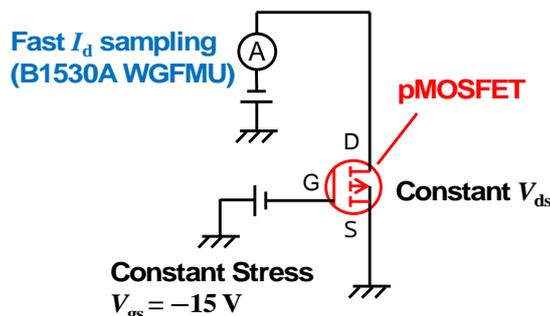


図 1 高速 On-the-fly 法測定回路

$$\Delta V_{th} = -\frac{I_{d0} - I_d(t)}{\frac{W}{L} \mu C_{ox} V_{ds}} = \frac{I_{d0} - I_d(t)}{g_{slope}}$$

従来の OTF 法においては、上式において、 g_{slope} は I_d - V_{gs} 特性の傾きを用い、測定中に変動しないと仮定していたが、実際は変動するという問題があった。本研究では、 g_{slope} の変動を考慮した“改良高速 OTF 法”を提案し、しきい値変動をより正確に反映した SiC NBTI 特性を得た。

(2) n チャンネル MOSFET に対する On-the-fly チャージポンピング(OTF-CP)測定

NBTI ストレスによる界面トラップ密度の変動を調べるために、チャージポンピング(CP)法に着目した。4H-SiC MOSFET に対してストレス後の CP 測定がすでに行われており、NBTI ストレスによる界面トラップ密度増加が報告されていた。しかし、そこで用いられている手法はストレス印加と遅い CP 測定スイープを繰り返す手法(MSM 法)である。通常の CP 測定は、測定時間が数十秒程度必要であり、またストレス印加から測定に移るまでのディレイ時間が発生してしまう。このように、ストレス印加から時間が経過した後のチャージポンピング電流(I_{CP})を解析に用いた場合、ストレス後の速い回復(再パッシベーション)によって、生成された界面トラップ密度が過小評価される可能性が高い。そこで、本研究では、ストレス除去後の回復を最小化した測

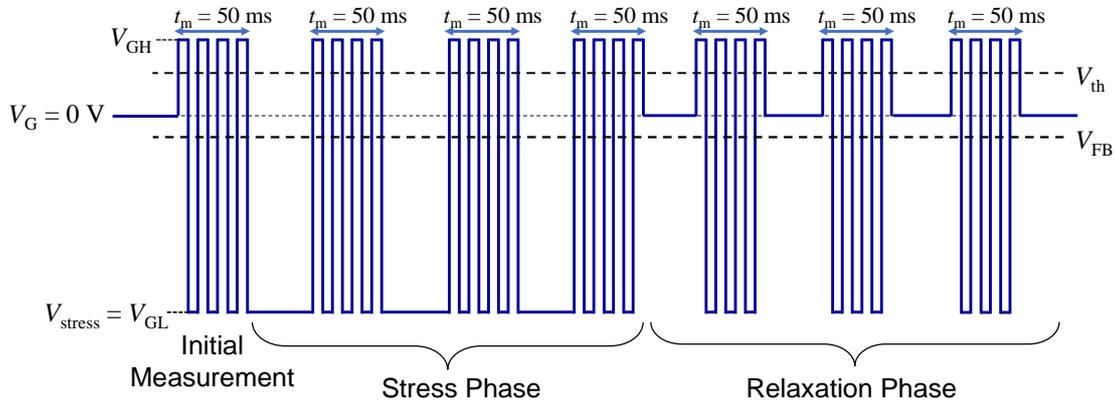


図2 OTF-CP測定で用いるゲートパルス

定手法である On-the-fly チャージポンピング(OTF-CP)法により、NBTI ストレス時の界面トラップ生成、およびストレス除去後の回復（再パッシベーション）の様子を調査した。

OTF-CP 法において MOSFET のゲートに入力するパルスの概略を図2に示す。4H-SiC n チャネル MOSFET にパルスジェネレーターを用いて負バイアスストレス(-15 V)を印加し、その状態のまま十分な振幅を持った測定パルスをゲートに印加し、基板に流れる CP 電流を測定した。これによりトラップの再パッシベーションがほとんど生じていないタイミングで CP 測定を行うことができる。また、ストレス電圧を 0 V とし、同様の CP 測定用のパルスを印加することで、ストレス除去後の回復過程を測定することもできる。

Si 面上に NO 窒化 60 min の条件で作製した n チャネル 4H-SiC MOSFET を用いて OTF-CP 測定を行った。Keysight B1525A パルスジェネレータユニットを備えた B1500A を外部制御するためのプログラムを自作し、ゲートに方形波パルスを印加し CP 電流を測定した。パルス印加期間は 50 ms とし、ストレス印加から測定パルス印加に切り替わった直後の CP 電流を測定できるよう、外部制御プログラムに工夫を施した。

(3) n チャネル MOSFET に対する Geometric component の系統的調査

上述の OTF-CP 測定を行っていく過程で、SiC n チャネル MOSFET に対する CP 特性が正確に行えているのかの疑問があったため、Geometric component の系統的調査を行った。理想的な CP 測定を行うためには、反転から蓄積に変化する際、伝導帯に放出された電子は基板から正孔が流れ込む前にすべてソース・ドレインに到達しなければならない。しかし、SiC はチャネル移動度が低いため、電子がソース・ドレインにたどり着かず CP 曲線に余分な再結合成分が含まれてしまう。この成分が Geometric Component である。Geometric Component が存在していると界面準位密度が過大評価されてしまう。したがって、正しく界面準位の評価を行うためには、Geometric Component を完全に除去できる条件を示すことが重要である。先行研究では温度依存性、周波数依存性など様々な条件が調べられているが、チャネル長依存性については十分に調べられていなかった。

そこで本研究では、異なるゲート酸化膜形成方法で作製した5種類の素子(Si面Dry酸化, NOアニール10min, NOアニール30min, NOアニール60min, NOアニール120min)に対し、ゲートに印加するパルスのベース電圧 V_{base} を -35 V から 10 V まで変化させ CP 測定を行った。8通りのチャネル長 ($L = 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 \mu\text{m}$) と4通りのパルス立下り時間 ($t_f = 100 \text{ ns}, 1 \mu\text{s}, 10 \mu\text{s}, 25 \mu\text{s}$) に対して測定を行い、Geometric component が生じる条件を系統的に調査した。

4. 研究成果

(1) p チャネル MOSFET に対する改良高速 OTF 法によるしきい値測定

上述した g_{slope} 変動を考慮に入れた改良高速 On-the-fly 法を用いて、 $\Delta V_{th}(t)$ を導出した。図3に従来法と提案法に対する $\Delta V_{th}(t)$ の比較を示す。改良高速 On-the-fly 法は高速 MSM 法では捉えることができない短時間領域での $\Delta V_{th}(t)$ を測定可能であることが分かる。図4に長時間領域(10^{-4} s以降)の $\Delta V_{th}(t)$ の比較を示す。長時間領域では緩和の影響を受けにくく、測定手法による変動の差はないと考えられるが、高速 On-the-fly 法と高速 MSM 法を比較すると差が出ている。これは、NBTI ストレス中のチャネル移動度変動により、 g_{slope} が一定ではないためと考えられる。次に g_{slope} 変動を考慮した改良高速 On-the-fly 法と高速 MSM 法を比較すると、 $\Delta V_{th}(t)$ がおおむね一致している。このことは、改良高速 On-the-fly 法がより正確な評価法であることを意味している。改良高速 On-the-fly 法の結果を用いて解析を行うと、長時間領域の変動は $\Delta V_{th} = B \cdot t^{0.043}$ に従うことが分かった。n チャネル素子を用いた遅い MSM 法では、 $\Delta V_{th} = A + B \cdot t^n$ に従うことが報告されているが、厳密な手法により、Aの項は不要であることが明らかとなった。このような時間のべき乗依存性は、NBTI ストレスによる新しいトラップの生成を示唆している。図5に全時間領域の $\Delta V_{th}(t)$ の温度依存性を、図6に長時間領域(10^{-4} s以降)の $\Delta V_{th}(t)$ の温度依存性を示す。短時間領域($t < 10^{-6}$ s)では、界面準位への捕獲による速い変動が見られるが、温度依存性がほとんど無

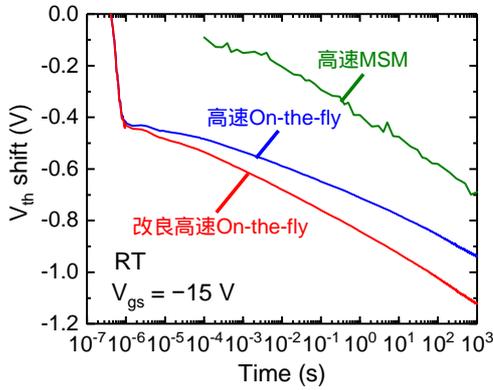


図3 従来法と提案法に対する $\Delta V_{th}(t)$ の比較

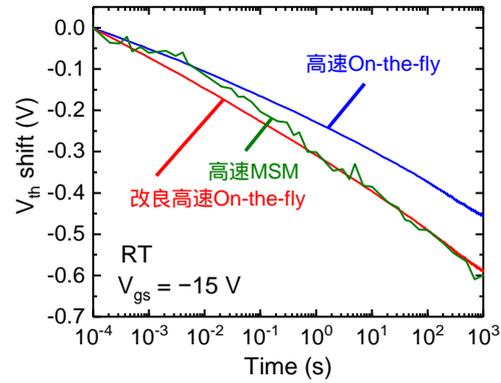


図4 長時間領域(10^{-4} s 以降)の $\Delta V_{th}(t)$ の比較

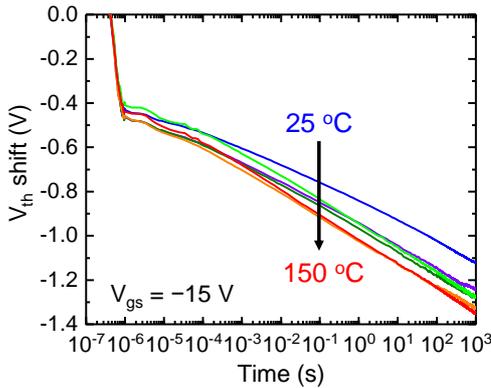


図5 全時間領域の $\Delta V_{th}(t)$ の温度依存性

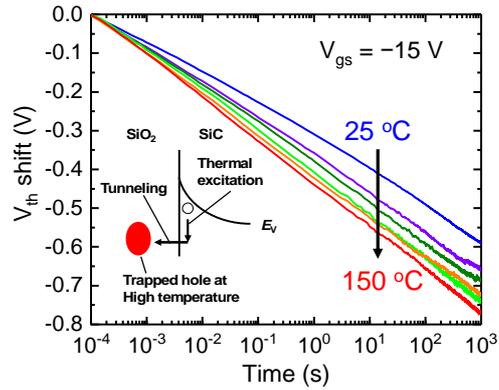


図6 長時間領域の $\Delta V_{th}(t)$ の温度依存性

い。これは SRH(Shockley-Read-Hall)モデルにおいて、捕獲に温度依存性が無いことで説明できる。一方、長時間領域では、温度上昇によって、 $\Delta V_{th} \propto \ln(t)$ に従うようになる。このような対数関数依存性は、酸化膜中の欠陥へのトラッピングが支配的であることを示唆している。これは、図6の挿入図に示すように、温度上昇により正孔が高エネルギー化し、価電子帯端から離れたエネルギー位置のトラップに捕獲されたためと考えられる。このように、実際のしきい値変動をより正確に反映した NBTI の議論が可能となった。

(2) n チャンネル MOSFET に対する On-the-fly Charge Pumping (OTF-CP)測定

図7に高温($T = 420$ K)で測定した NBTI ストレスによるチャージポンピング電流の変化量 ΔI_{CP} と、ストレス除去後の ΔI_{CP} の様子を示す。 ΔI_{CP} はストレス印加前($t = 0$ s)の時のチャージポンピング電流との差分として求めた。チャージポンピング電流は、界面準位密度に比例するため、 ΔI_{CP} は界面準位密度の増減に対応する。ここでは、 -15 V の NBTI ストレスを 1000 s 印加したのち、ストレス電圧を 0 V とし、回復の様子を観察した。図7においては、負バイアスストレス印加によって、 I_{CP} が増加し、ストレス除去後に再パッシベーションにより I_{CP} が減少していることが分かる。絶対値は異なるものの、Si p チャンネル MOSFET で見られる NBTI 劣化・回復のトレースと非常に類似した形状となっている。この結果は、Si と同様、4H-SiC MOSFET においても界面トラップが生成・および部分的に回復することを意味している。これらは、 1000 s のストレスにより $N_{it} = 3.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ から $4.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ へ界面トラップ密度が増加し、 1000 s の緩和後 $4.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ に減少したことに相当する。なお、ここで評価した界面トラップ密度は、伝導帯端および価電子帯端からおおよそ 0.16 eV 以上離れたバンドギャップ中央部分の値である点に注意が必要である。4H-SiC MOSFET においては、ホールトラッピングによるしきい値電圧変動の成分が大きいいため見落とされることが多いが、本研究では NBTI ストレスによって界面準位が生成されていることを明確に示すことができた。物理メカニズムについて結論を得るには時期尚早であるが、Si における R-D(Reaction-Diffusion)モデルと類似したモデルで説明できる可能性があ

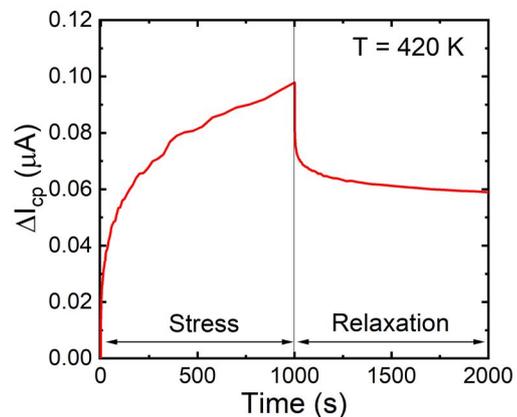


図7 高温における OTF-CP 特性

る。また、ストレス除去後の再パッシベーションを調べたところ、回復は部分的であることが判明した。インバータ駆動を模擬した AC ストレスによる変動を議論する際には、完全に回復しない事を考慮してモデルを構築することが重要であるといえる。

(3) n チャネル MOSFET に対する Geometric component の系統的調査

図 8 に 10 分の NO アニールにより作製した MOSFET に対する CP 曲線の t_f 依存性を示す。また、図 9 に 10 分の NO アニールにより作製した MOSFET における L 依存性を示す。同様の結果を他のサンプルに対しても行った。図 10、図 11 に 60 分の NO アニールによって作成したデバイスに対する結果を示す。 t_f を $10 \mu\text{s}$ より長くすると CP 曲線の上底が平坦に近づき、理想的な CP 曲線に近づくことが分かる。これは、 t_f が $10 \mu\text{s}$ より長くなると電子がソース・ドレインに到達するのに十分な時間が得られ、Geometric Component が抑制されたためと考えられる。 L が $5 \mu\text{m}$ 以下では単位面積当たりの最大 CP 電流はほぼ同じ値となっているが、 $5 \mu\text{m}$ より大きくなると、少しずつ増加することが分かる。これは L が $5 \mu\text{m}$ より長くなると、Geometric Component の成分を除去できていないことを意味している。これらの結果より、NO 120 min の素子に対して正確に CP 測定を行うためには、 $t_f = 10 \mu\text{s}$ 以上、 $L = 5 \mu\text{m}$ 以下が望ましいと言える。ここには示していない他の窒化条件の素子に対しても同様の実験を実施し、各条件に対して Geometric component が抑制できる条件を明確化した。

これらの研究を通じて、SiC MOSFET における NBTI のメカニズムは、既存のトラップへの正孔捕獲に加え、新たな界面準位が生成されていることが原因であることが明らかとなった。また、窒化時間が長いサンプルほど、しきい値電圧変動や界面準位の生成が大きかった。過剰な窒化はしきい値変動の悪化につながるため、適切に窒化時間を選択し、高チャネル移動度としきい値変動の抑制の両立を図ることが重要であることを示した。

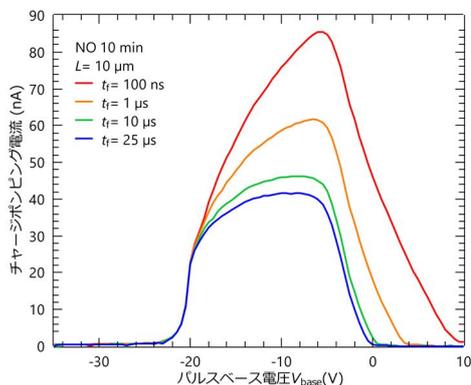


図 8 NO10 分素子の t_f 依存性

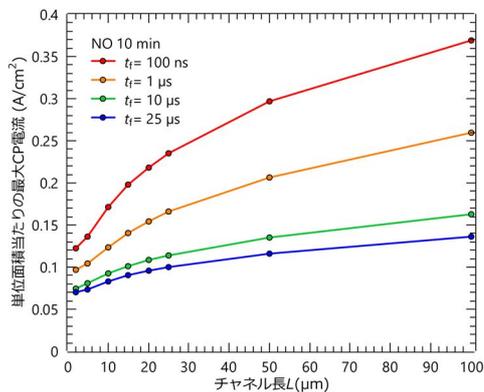


図 9 NO10 分素子の L 依存性

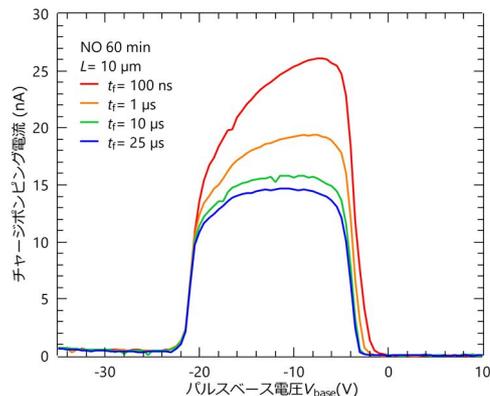


図 10 NO60 分素子の t_f 依存性

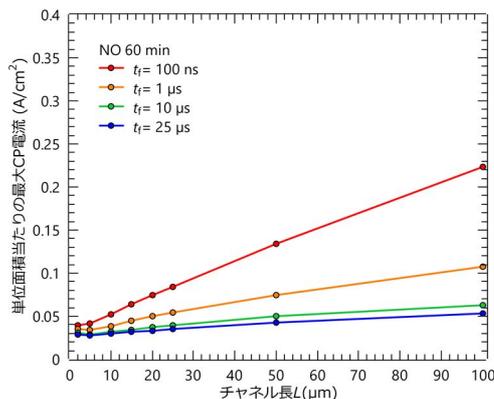


図 11 NO60 分素子の L 依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sakata Hiroki, Okamoto Dai, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Hirai Hirohisa, Harada Shinsuke, Hatakeyama Tetsuo, Yano Hiroshi, Iwamuro Noriyuki	4. 巻 60
2. 論文標題 Accurate determination of threshold voltage shift during negative gate bias stress in 4H-SiC MOSFETs by fast on-the-fly method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060901 ~ 060901
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abff38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 石塚 巧真, 岡本 大, 染谷 満, 平井 悠久, 岡本 光央, 畠山 哲夫
2. 発表標題 SiC MOSFETにおけるCharge Pumping電流の素子形状依存性
3. 学会等名 令和4年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dai Okamoto, Mitsuru Sometani, Hirohisa Hirai, Mitsuo Okamoto, Tetsuo Hatakeyama
2. 発表標題 Understanding Negative Bias Temperature Instability in 4H-SiC MOSFETs by Fast Threshold Voltage Measurements
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dai Okamoto, Mitsuru Sometani, Hirohisa Hirai, Mitsuo Okamoto, Tetsuo Hatakeyama
2. 発表標題 Negative Bias Temperature Instability in 4H-SiC MOSFETs Investigated by On-the-fly Methods
3. 学会等名 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡野 夏樹, 岡本 大, 染谷 満, 平井 悠久, 岡本 光央, 畠山 哲夫
2. 発表標題 On-the-fly charge pumpingの温度依存性測定によるSiC MOSFETのNBTI特性の解析
3. 学会等名 令和3年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂田 大輝, 岡本 大, 染谷 満, 平井 悠久, 岡本 光央, 原田 信介, 畠山 哲夫, 矢野 裕司, 岩室 憲幸
2. 発表標題 改良高速On-the-fly法によるSiC MOSFETのNBTI評価
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会第8回講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 大, 染谷 満, 平井 悠久, 岡本 光央, 原田 信介, 畠山 哲夫
2. 発表標題 On-the-fly Charge Pumping法によるSiC MOSFET NBTI劣化メカニズムの解析
3. 学会等名 第26回 電子デバイス界面テクノロジー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂田 大輝, 岡本 大, 染谷 満, 平井 悠久, 岡本 光央, 原田 信介, 畠山 哲夫, 矢野 裕司, 岩室 憲幸
2. 発表標題 改良高速On-the-fly法によるSiC MOSFETの正確なNBTI評価
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会第7回講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	染谷 満 (Sometani Mitsuru)		
研究協力者	畠山 哲夫 (Hatakeyama Tetsuo)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------